

УДК 621. 396: 621.372

GPS-НАВИГАЦИЯ И ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ СЪЕМКА - РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ OMNISTAR

А. А. Жалило, В. М. Кондратюк, В. В. Конин, В. Г. Сушко,
В. П. Харченко, Д. А. Шелковенков, В. М. Шокало, А. В. Куценко

Представлены результаты экспериментальной оценки точности и надежности координатных определений в статическом и кинематическом режимах с использованием зональных (WADGPS) дифференциальных VBS/HP-коррекций компании OmniSTAR. Кратко описаны основные принципы и характеристики VBS/HP-технологий, обеспечивающих высокоточную дифференциальную DGPS навигацию и геодезическую съемку с уровнем точности ~1 м (VBS) и ~10 см (HP) в реальном времени. Такие экспериментальные исследования проведены в Украине впервые, а их результаты, могут представлять интерес для ряда групп GPS-пользователей.

Краткая характеристика технологий точного позиционирования.

Рост требований к точности и надежности определения местоположения обусловил появление широкозонных дифференциальных WADGPS подсистем и соответствующих информационных услуг.

При традиционном методе дифференциальной навигации [1, 2] референсная станция автономно формирует и распространяет потребителям DGPS-коррекции. При нормальных условиях остаточные после коррекции погрешности позиционирования обусловлены атмосферными эффектами, многолучевостью и орбитальными ошибками. Для погрешностей с сильной пространственно-временной корреляцией эффективность коррекций уменьшается с увеличением расстояния между базовой станцией и потребителем. На больших расстояниях 500–2000 км точность DGPS-позиционирования практически сравнима с точностью автономного режима.

При широкозонном подходе наблюдения разреженной сети GPS-станций совместно обрабатываются, чтобы максимально использовать свойства сильной пространственно-временной корреляции атмосферных и орбитальных погрешностей путем их моделирования в зоне покрытия сети референчных станций.

Можно выделить две группы алгоритмов для формирования WADGPS-коррекций. Первая группа формирует коррекции в пространстве измерений, вторая – в пространстве состояний отдельных моделируемых составляющих погрешностей наблюдений [3- 5].

При реализации первого подхода, который в литературе название **Multi-Reference Differential (MRD)**, на каждой станции сети одновременно формируются кодовые DGPS-коррекции. Эти коррекции подвергаются обработке таким образом, чтобы сформировать оптимальные для потребителя поправки, получившие название коррекций виртуальной референчной станции (**Virtual Reference (Base) Station – VRS(VBS)**). Для **MRD/VRS** метода необходимо относительно небольшое количество референчных станций. Так, компания **OmniSTAR/FUGRO** обеспечивает VBS-коррекциями Северную Америку с использованием только 10 станций.

Во втором подходе, получившем название **Wide Area Differential (WAD)**, по двухчастотным наблюдениям сети референчных станций вычисляются параметры моделей каждого источника погрешностей в отдельности. Обычно это – уходы спутниковых часов, эфемериды и ионосферная задержка. Параметры, описывающие поведение этих погрешностей, передаются потребителям в зоне обслуживания сети (GPS/GNSS-подсистемы). У потребителей вектор параметров коррекций преобразуется в вектор коррекций наблюдений для каждого спутника в отдельности с учетом текущего местоположения. В широком смысле этот метод также можно отнести к классу **VRS-**

методов. Метод положен в основу подсистем **WAAS**, **EGNOS** и др. Он значительно сложнее **MRD**-метода и требует адекватного количества референчных станций для его реализации. Считается, что **WAD**-метод потенциально обладает большими возможностями по ряду характеристик по сравнению с методом **MRD**. Хотя, как показывает практика, оба метода в эквивалентных условиях дают практически одинаковые результаты. В современных коммерческих двухчастотных сетевых системах (**High Performance (HP) OmniSTAR/FUGRO** и **StarFire NavCom Technologies/John Deere**) высокой (дециметровой и сантиметровой) точности с использованием фазовых наблюдений применяют комбинированные методы.

Технологии **HP**, в статическом и кинематическом режимах съемки, по заявлениям **OmniSTAR**, имеет точность **~10 см (95%)** по плановым координатам и **~20 см (95%)** по вертикали в реальном времени при зонах покрытия разреженных сетей станций на удалении от референчных станций до 1000 км.

Принципиальные отличия и необычные возможности таких технологий и систем по отношению к традиционным DGPS-технологиям обусловлены следующим:

- применением сетевого принципа** совместной обработки наблюдений сети референчных двухчастотных GPS станций, что позволяет оценить эфемеридные, ионосферные, тропосферные и частотно-временные погрешности;
- использованием фазовых наблюдений** позволяющих достичь на один-два порядка более высокие точности, чем при кодовом DGPS-методе; компании **OmniSTAR** удалось решить задачу разрешения неоднозначности фазовых наблюдений на измерительных базах до 1000 км в реальном времени;
- **применением двухчастотных приемников у потребителей**, что исключает наиболее значимую и изменчивую ионосферную составляющую погрешностей наблюдений.

Необходимо также отметить, что сеть двухчастотных референчных станций **OmniSTAR** позволяет генерировать информацию о точных спутниковых орбитах и уходах спутниковых часов. Выполняя коррекции наблюдений за влиянием твердых и океанических приливов, движением полюсов, можно, в принципе, определять точные координаты в любой точке земной поверхности даже вне зоны действия базовых станций. Такому режиму работы присвоено условное название **XP**. Комбинированное использование технологий **XP** и **HP**, увеличивает надежность точного определения местоположения. Вне зоны действия **HP** обеспечивается только **XP**-решение. При этом также заявляется дециметровая точность определений.

Наиболее характерные результаты тестирования технологий **HP** представлены в работах [6-10]. В [6] представлены погрешности (в плане и по вертикали) координатных определений движущегося морского катера в ходе тестирования с использованием стандартного режима RTK в качестве эталона. Результаты тестирования режима **HP** 19 июля 2001 г. в Мексиканском заливе показали достижение дециметровой точности местоопределения в кинематическом режиме (скорость движения объекта – 10 узлов) на удалении от базовых станций от 400 до 1000 км; эталонная траектория объекта получена с сантиметровой точностью в стандартном режиме RTK с использованием отдельной референчной станции на удалении от объекта 10 – 35 км. Результаты из публикаций [2, 3] описывают многосуточные тесты в ходе статической и динамической ре-инициализации. Из результатов, полученных в [6-8], следует, что в приемлемых для измерений условиях радиовидимости наблюдаемый период сходимости при инициализации составляет ~30 мин для оценки с заявленной точностью широты и высоты. Оценка долготы с заявленной точностью из-за особенностей конфигурации орбит спутников GPS требует значительно большего времени сходимости – примерно 120 мин.

С середины мая 2003 г. на территории Украины (г. Харьков) функционирует GPS станция компании **OmniSTAR BV**. С этого момента в любом регионе Украины GPS-потребителям доступен **HP**-сервис заявленной дециметровой точности кроме **VBS**-сервиса субметровой точности. Корректирующие **VBS** и **HP** поправки передаются в

L-диапазоне через созвездие геостационарных спутников. Высокоточный сервис **HP** является привлекательным, так как позволяет в реальном времени решать широкий круг задач высокоточной геодезической съемки, картографии, ГИС и других геодезических приложений без дополнительных базовых станций потребителей и послесанной обработки наблюдений.

С целью независимой оценки качества (точности и надежности) позиционирования с использованием **VBS/HP** технологий силами нескольких организаций в Киеве 24-26 мая 2006 г проведены соответствующие тестовые испытания на территории Национального авиационного университета (НАУ) и на трассе «Киев-Житомир». В проведении экспериментов принимали участие сотрудники НАУ, Харьковского национального университета радиозлектроники (ХНУРЭ), Главной астрономической обсерватории НАН Украины (ГАО НАНУ) и аэрокосмического агентства «Магеллан», г. Киев.

Методика экспериментальных исследований. В основу методики тестирования по точности позиционирования было положено требование, чтобы эталонные координаты или пространственные параметры движения тестируемого «роверного» приемника были известны с точностью, в несколько раз большей, чем точностьверяемых средств позиционирования. Расхождения (невязки) между оцененными координатами, полученными с использованием тестируемых технологий **VBS/HP**, и эталонными координатами должны были оценить точностьверяемых средств местоопределения.

В процессе тестирования при проведении наблюдений накапливались параллельно не только результаты дифференциального местоопределения в реальном масштабе времени (РМВ), но и «сырые» наблюдения этого же приемника. Накопленные «сырые» наблюдения, включающие и высокоточные двухчастотные фазовые наблюдения, позволили с использованием аналогичного набора данных близлежащей референцной станции оценить статические и кинематические текущие координаты антенны «роверного» двухчастотного приемника, с помощью которого выполняется тестирование дифференциального навигационного обеспечения в режиме послесанной обработки с применением апробированного программного обеспечения. При этом достигалась сантиметровая и даже миллиметровая точность определения эталонных координат.

Геодезическая привязка базовых станций и все расчеты выполнялись в системе координат ITRF-2000. Привязка осуществлялась с использованием наблюдений и точных координат ближайшей перманентной референцной GPS-станции GLSV (приемник **Trimble 4000 SSI**) ГАО НАНУ, входящей в международную сеть IGS [11].

При тестировании анализировалась способность приемника к быстрой инициализации (ре-инициализации) – периоду времени, в течение которого достигается заданный уровень точности определений, после чего при отсутствии перерывов связи приемник должен обеспечить заявленный уровень точности местоопределения в процессе движения, в различных условиях (режим определений, величина геометрического фактора, динамика объекта).

Перед выполнением измерений на полигоне НАУ с использованием комплекта геодезического GPS-оборудования **Trimble 5700** были «привязаны» с сантиметровой точностью 20 точек-реперов в режиме «Stop&Go». Привязка базовой станции (на выбранной наземной точке) и вынесенных 20 точек-реперов на территории НАУ осуществлялись относительно IGS-станции GLSV. Позиция фазового центра антенны базовой станции была привязана с миллиметровой точностью относительно IGS-станции GLSV.

Обработка наблюдений по привязке базовой станции точек-реперов показало, что невязки по координатам базовой станции находились в пределах сантиметра, а по координатам реперных точек – в пределах нескольких сантиметров, поскольку измерения выполнялись с использованием подвижной вехи в режиме «Stop&Go».

При проведении экспериментов было использовано специальное GPS оборудование и программное обеспечение:

- приемник **NovAtel ProPak-LB Plus**, способный принимать и обрабатывать высокоточные **VBS-** и **HP-**коррекции;
- комплект геодезического GPS оборудования **Trimble 5700** для геодезической привязки и получения эталонных координат;
- геодезический приемник **NovAtel DL-4** в качестве базовой станции;
- GPS приемник **NovAtel FlexPak-SSII** – в качестве дополнительного «роверного» приемника, установленного на автомобиле для выполнения измерений в кинематическом режиме;
- программное обеспечение **GrafNav/GrafNet** (ver.7.60.2425) для послесанной обработки компании; также независимо использовалось и программное обеспечение послесанной обработки компании **Trimble** (США).
- антенны **GPS-600-LB, GPS-702**.

В ходе экспериментов было проведено 5 сессий наблюдений, которые включали статическую и кинематическую съемки. Во время съемок для последующего анализа были записаны результаты текущего координатного решения и внутренние оценки погрешностей (СКО) решения приемника, а также первичные «сырые» наблюдения для расчета опорной (эталонной) траектории приемника в послесанном режиме с использованием ПО **GrafNav/GrafNet**. Условно эксперименты были разбиты на 3 этапа-статическая съемка на полигоне НАУ; съемка координат реперных точек в режиме «Stop&Go» на полигоне НАУ со статической инициализацией; кинематика со статической инициализацией (антенна установлена на автомобиле).

Для каждого из этапов ниже представлены результаты экспериментов

Финальные результаты экспериментальной оценки точностных и эксплуатационных характеристик позиционирования в статическом и кинематическом режимах с применением VBS/HP-коррекции.

Статическая съемка (рис. 1 – рис. 4). Результаты измерений, полученные с помощью приемника **ProPak-LB plus**, обработка выполнена ПО **GrafNav/GrafNet**.

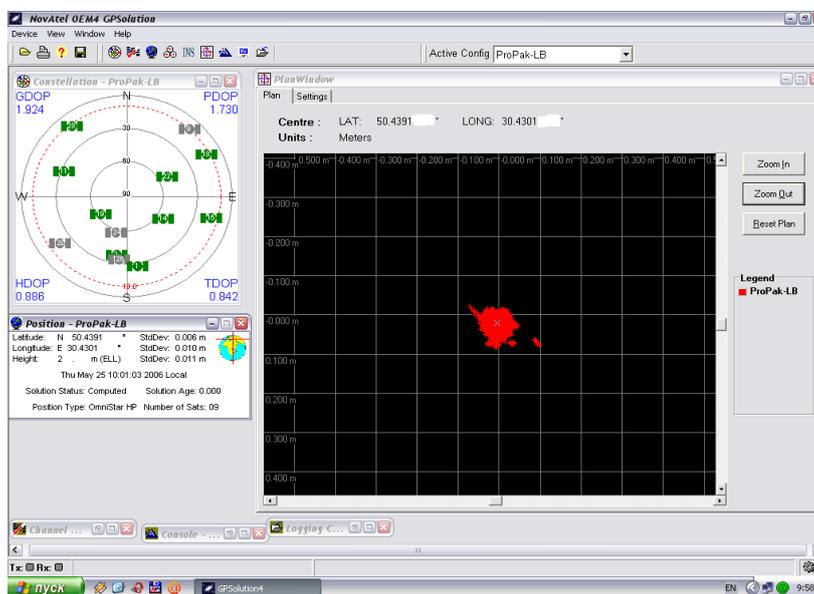


Рис. 1 – Интерфейсная программа приемника **ProPak – LB plus**.

На рис. 1 разброс оценок текущих плановых координат в режиме реального времени относительно эталонных значений не превышает **10 см (2σ)**

Как следует из рис. 2 – рис. 4, при статической съемке инициализация занимает **20-30 мин** для широты и высоты и **1-2 часа** для долготы. Наблюдается стабильная работа приемника в режиме **HP** с точностью координатного решения не превышающего **10см (2σ)** для плановых координат и **15см (2σ)** для высоты.

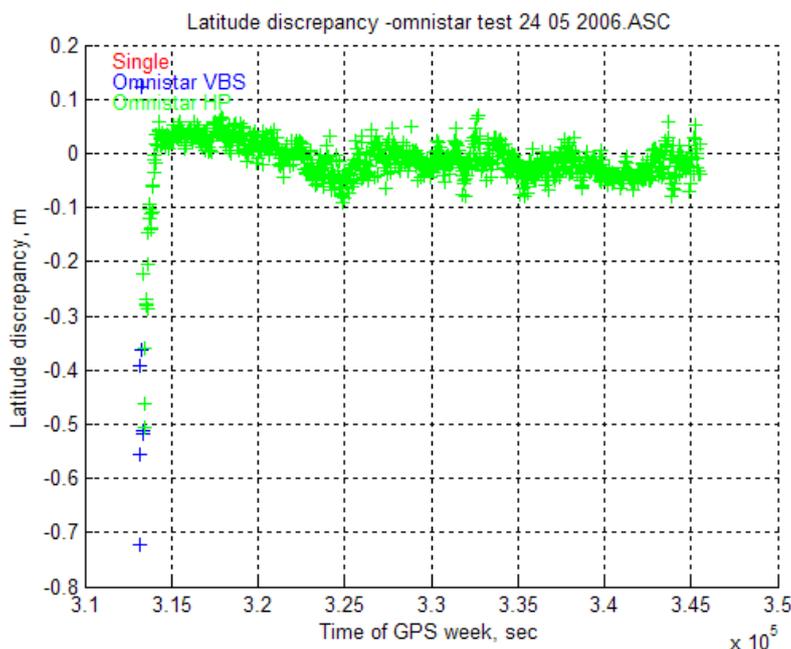


Рис. 2 – Разность оценок широты, в послесеансном режиме

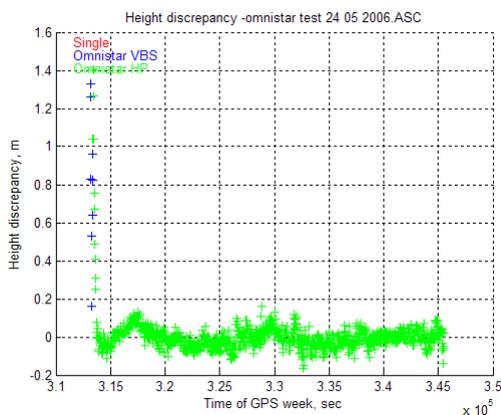


Рис. 3 – Разность оценок высоты.

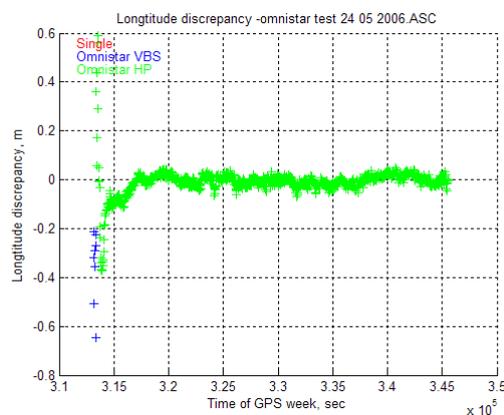


Рис. 4 – Разность оценок долготы.

Результаты съемки в режиме «Stop/Go» на полигоне НАУ изображены на рис. 5 – рис. 10. Начало сеанса измерений соответствует началу движения от точки статической инициализации. При хороших геометрических условиях обеспечивалась нормальная работа приемника при движении приемника по реперным точкам в режиме “Stop/Go” с точностью, заявленной для **Omnistar HP**. После срыва слежения за геостационарным спутником и увеличения геометрического фактора из-за частичного закрытия небесной сферы приемник перешел в режим **VBS**, а затем начал повторную инициализацию режима **HP**. После инициализации была сделана попытка повторной съемки в зоне затенения. В интервале $T = 395250\text{c} - 395750\text{c}$ был произведен вертикальный переворот вежи с антенной на 180 градусов (антенна «смотрит» вниз) с целью имитации разрыва слежения и проверки возможности быстрой ре-инициализации.

Результаты кинематической съемки на автомобиле показаны на рис. 11 – рис. 17.

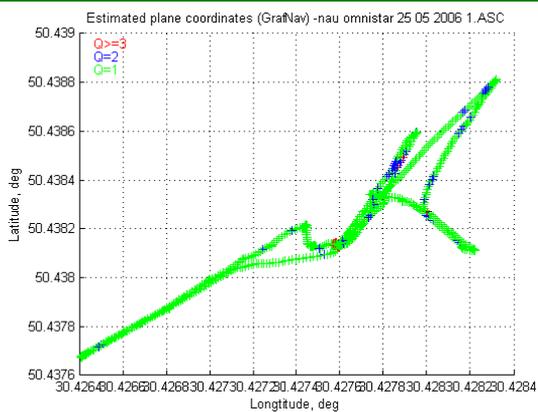


Рис. 5 – Оценки плановых координат.

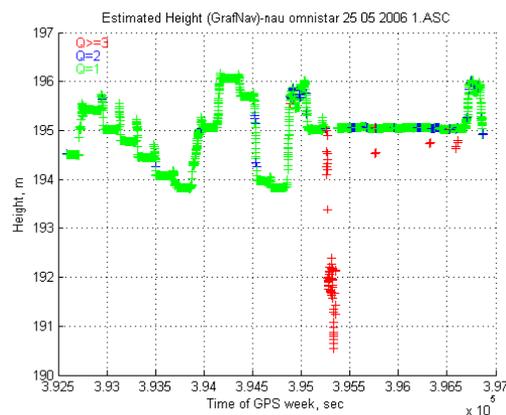


Рис. 6 – Оценки высоты.

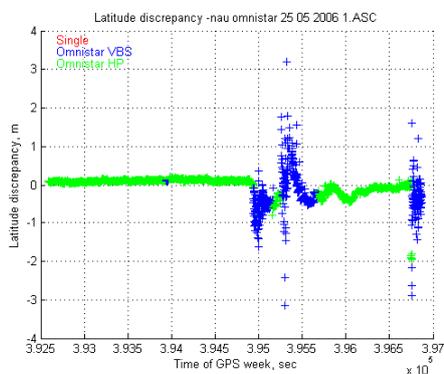


Рис. 7 – Разность оценок широты в режиме РМВ

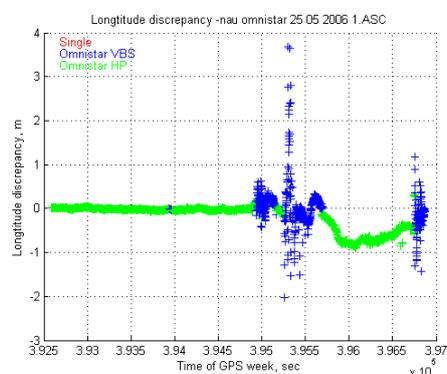


Рис. 8 – Разность оценок долготы в режиме РМВ.

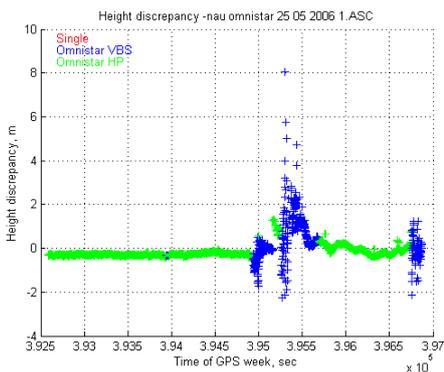


Рис. 9 – Разность оценок высоты в режиме РМВ.

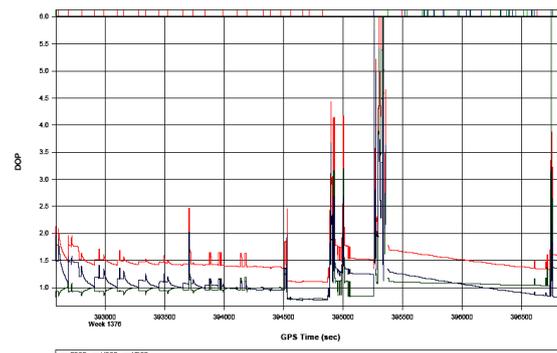


Рис. 10 – Геометрические факторы сессии наблюдений

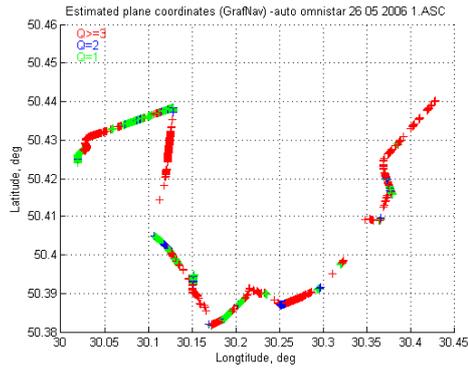


Рис. 11– Оценки плановых координат

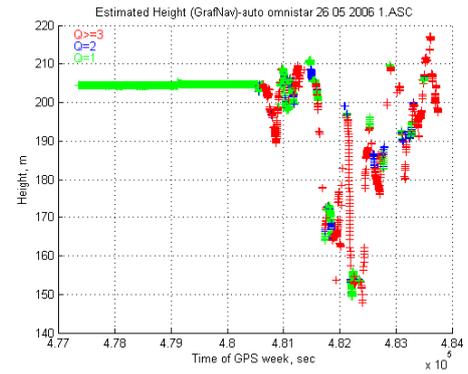


Рис. 12– Оценки высоты.

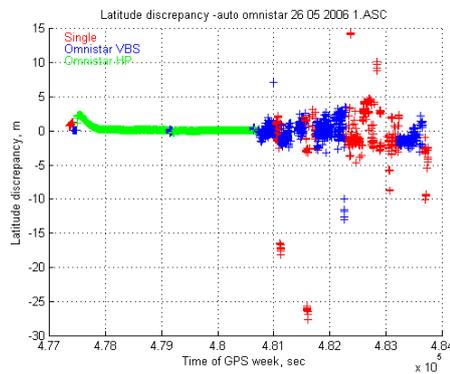


Рис. 13– Разность оценок широты в режиме РМВ

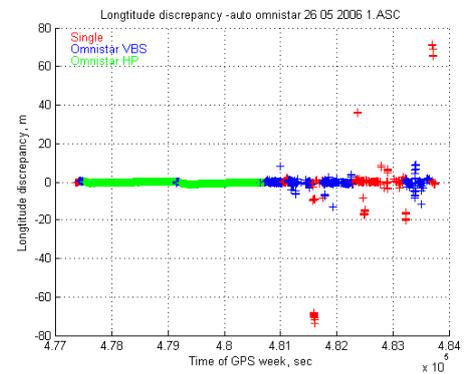


Рис. 14 – Разность оценок долготы, в режиме РМВ.

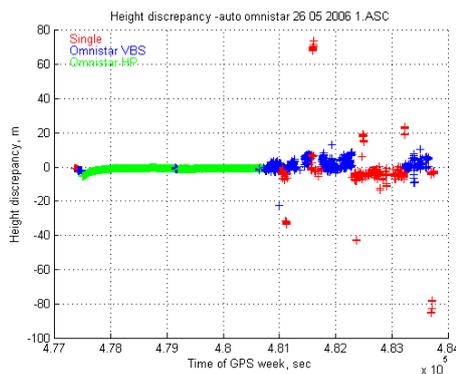


Рис. 16– Разность оценок высоты в режиме РМВ

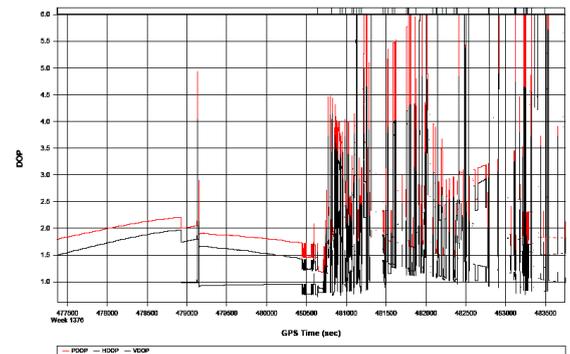


Рис. 17- Геометрические факторы сессии

После 30 минут инициализации произошло кратковременное затенение антенны, что привело к полному сбросу режима **HP**. После повторной инициализации было начато движение автомобиля. При равномерном движении по открытой местности наблюдалась устойчивая работа в режиме **HP**, но после затенения приемной антенны деревьями произошел переход из режима **HP** в режим субметровой точности **VBS**. Далее движение автомобиля происходило по сельской местности в пригородном районе г. Киева.

Начиная с $T = 480750$ с из-за частого частичного или полного закрытия небесной сферы наблюдался значительный рост геометрического фактора и разрывы наблюдений, что привело к значительному ухудшению измерительной информации.

Краткие результаты тестирования. Результаты оценки качества (точности и надежности) навигационных определений в Киеве Украине показали, что в условиях надежного приема сигналов спутников GPS и корректирующих сигналов OmniSTAR в режиме HP в реальном времени обеспечивается заявленная дециметровая точность определения местоположения. Для достижения этого требуется несколько десятков минут для инициализации (вхождения в режим) высокоточных координатных определений.

В процессе инициализации после необходимых по инструкции настроек приемника включается автономный режим определений с точностью нескольких метров. Через несколько минут включается дифференциальный VBS-режим – приемник определяет координаты с точностью 1-2 м с последующим плавным повышением точности. Затем через 5-10 мин включается режим HP и погрешности местоопределения (широта, долгота, высота) скачком увеличиваются с последующим экспоненциальным уменьшением до дециметрового (требуется ~30 мин для достижения заявленной точности определения широты и высоты, и ~(60-120) мин для долготы) и даже субдециметрового уровня. Инициализацию в кинематическом режиме на территории НАУ в режиме «Stop&Go» и в кинематическом режиме измерений в процессе движения на борту автомобиля выполнить не удалось.

При срыве слежения (отсутствие коррекций, потери слежения за спутниками из-за обструкций, резкое ухудшение геометрического фактора) приемник при возобновлении слежения переходит в режим VBS (метровая точность) и повторяет заново режим инициализации. Отмечается значительная (десятки минут) длительность периода ре-инициализации для высокоточного режима HP после потери слежения за сигналами геостационарных спутников или при временном ухудшении геометрии рабочего созвездия спутников GPS в условиях затенений или высокой динамики движения. При очень коротких перерывах (несколько секунд) приема коррекций наблюдалось быстрое восстановление HP-режима работы без потери точности. В режиме VBS субметровая точность определений обеспечивается достаточно надежно с достаточно коротким периодом ре-инициализации даже в кинематическом режиме работы (в движении).

Эти результаты, несмотря на относительно короткий период проведения испытаний, в значительной степени соответствуют оценкам как самой фирмы **OmniSTAR BV** и согласуются с результатами экспериментов полученными независимыми зарубежными организациями.

Заявленные характеристики точности достигаются в нормальных условиях радиовидимости GPS и геостационарных спутников, через которые доставляется корректирующая информация. В то же время, отмечается значительная (десятки минут) длительность периода ре-инициализации для высокоточного режима HP после потери слежения за сигналами геостационарных спутников или при временном ухудшении геометрических условий в условиях затенений или высокой динамики движения. Для достижения 10 см точности требуется ~30 мин для определения широты и высоты, и ~(60-120) мин для долготы. Инициализацию в кинематическом режиме на территории НАУ в режиме «Stop&Go» и в кинематическом режиме измерений в процессе движения на борту автомобиля выполнить не удалось.

При срыве слежения (отсутствие коррекций, потери слежения за спутниками из-за обструкций, резкое ухудшение геометрического фактора) приемник при возобновлении слежения переходит в режим VBS (метровая точность) и повторяет заново режим инициализации. Отмечается значительная (десятки минут) длительность периода ре-инициализации для высокоточного режима HP после потери слежения за сигналами геостационарных спутников или при временном ухудшении геометрии рабочего созвездия спутников GPS в условиях затенений или высокой динамики движения. При очень

коротких перерывах приема коррекций наблюдалось быстрое восстановление **НР**-режима работы без потери точности. В режиме **VBS** субметровая точность определений обеспечивается достаточно надежно с достаточно коротким периодом ре-инициализации даже в кинематическом режиме работы.

Для окончательных выводов необходимо провести дополнительную серию измерений на борту таких объектов, как самолет, речное или морское судно и выполнить их анализ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабак В. П., Конін В. В., Харченко В. П.** Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с.
2. **Соловьев Ю. А.** Спутниковая навигация и ее приложения, М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2003. -326 с.
3. **Жалило А.А., Кондратюк В.М.** (2005) Спутниковый высокоточный дифференциальный VBS&НР-сервис компании FUGRO/OMNISTAR BV: технологии GPS-местопределения и их характеристики //Сборник трудов 2-го Международного радиоэлектронный Форума (МРФ-2005) «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Международная конференция по системам локации и навигации (МКЛСН-2005), г. Харьков, ХНУРЭ, 19-23 сентября, 2005 г.,Т.2, С. 516-519.
4. **Харченко В.П., Жалило А.А., Конин В.В., Кондратюк В.М.** - Методики экспериментальной оценки навигационных характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS(GNSS) //Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26-28 квітня 2004 р. Том 2, с. 21.10 – 21.16
5. **Харченко В.П., Жалило А.А., Конин В.В., Кондратюк В.М.** - Способы и средства оценки тактико-технических характеристик широкозонных функциональных дополнений GPS (GNSS) //Аерокосмічні системи моніторингу та керування, Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 26-28 квітня 2004 р. Том 2, с. 21.17 – 21.23.
6. **Lapucha D., Barker R.,Ott L., Melgård T.E., Ørpen O., and Zwaan H.** (2001). Decimeter-level real-time carrier phase positioning using satellite link, Proceedings of the Institute of Navigation ION 2001, 11-14 September, Salt Lake City, Utah, USA, pp. 1624-1630.
7. Decimetre Network Performance. OmniSTAR HP (2004), The European Navigation Conference GNSS 2004, 147, p. 1.
8. **Bisnath S., Wells D. and Dodd D.** (2003). Evaluation of Commercial Carrier Phase-Based WADGPS Services for Marine Applications, Proceedings of the Institute of Navigation GPS/GNSS 2003, 9-12 September 2003, Portland, Oregon, USA, pp. 17-27.
9. **Ørpen O., Melgård T.E.** (2004). Advances in DGPS Systems, The European Navigation Conference GNSS 2004, 111, pp. 1-6.
10. **Lapucha. D., Barker R., Zwaan H.** (2004). Wide Area Carrier Phase Positioning - Comparison of the Two Alternate Methods, The European Navigation Conference GNSS 2004, 159, pp. 1-8.
11. Укргеокосмосмережа. Українська мережа станцій космічної геодезії та геодинаміки/ За ред. акад. Я. С. Яцківа. – К. : Компанія ВАТІТЕ, 2005.- 60 с.